

Report, Published Version

**Ehmann, Rainer**

## **Bauwerksmessungen an der Kanalbrücke Magdeburg. FuE-Abschlussbericht A395 101 10038. FuE 81 76**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106993>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2010): Bauwerksmessungen an der Kanalbrücke Magdeburg. FuE-Abschlussbericht A395 101 10038. FuE 81 76. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

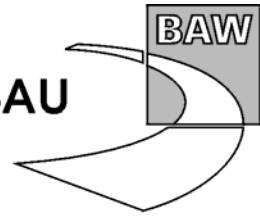
Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**  
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

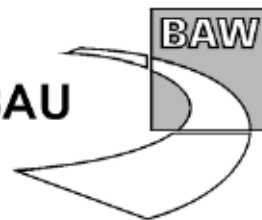


**FuE 81 76**

**Bauwerksmessungen an der  
Kanalbrücke Magdeburg  
-Abschlussbericht -  
A395 101 10038**



**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**  
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau



**FuE 81 76**  
**Bauwerksmessungen an der Kanalbrücke Magdeburg**  
**- Abschlussbericht -**

Auftrags-Nr.:                      BAW-Nr. A395 101 10038

Aufgestellt von:                      Abteilung: Bautechnik  
   Referat:    Massivbau  
   Bearbeiter: Ehmann

Karlsruhe, den 18. März 2010

Der FuE- Abschlussbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## Zusammenfassung

Bei der Herstellung der rund 920 m langen Kanalbrücke Magdeburg, die aus einer 3-feldrigen Strombrücke über die Elbe und einer 16-feldrigen Vorlandbrücke besteht, waren für eine zielgerichtete Einlagerung, die ein Lagerabheben bei geleertem Trog ausschließt, eine Messung des instationären Temperaturfeldes des Brückenquerschnittes erforderlich. Die Komplexität der Konstruktion und der technischen Randbedingungen veranlassten das WNA Magdeburg und die WSD Ost darüber hinaus ein umfangreiches Messprogramm zu installieren, das im Laufe der Zeit sukzessive ergänzt wurde. Die Messungen umfassen:

- Setzungsmessungen der Strompfeiler
- Temperaturmessungen im stählernen Überbauquerschnitt, Luft- und Wassertemperatur
- Lagerkraftmessungen an allen 93 Lagern
- Kippspaltmessungen in 2 Richtungen an allen Lagern
- Gleitspaltmessungen an allen Lagern
- Ankerkraftmessungen an 68 Rückverankerungssystemen der Vorlandbrücke

Die permanenten Messwerte werden über ein Computerprogramm, das im Rahmen dieses FuE-Vorhabens entwickelt wurde, verarbeitet, konsolidiert und korrigiert. Über eine wirklichkeitsnahe Strukturanalyse wurde in mathematischer Form die Beziehungen von Einwirkungen und Bauwerksreaktionen hergeleitet und in das Programm implementiert. Dadurch ist es möglich, dass bei Überschreitung von vorher definierten, dynamisch angepassten Schranken Warnmeldungen vom System ausgegeben werden, so dass der Betreiber, das WSA Magdeburg, entsprechend reagieren kann. Damit sollen rechtzeitig Unregelmäßigkeiten erkannt und Schäden vermieden werden. Des Weiteren dient es zur effizienten Unterstützung bei der Bauwerksinspektion (Brückenprüfung).

Das im Rahmen dieses FuE-Vorhabens entwickelte Monitoringsystem ist beim WSA Magdeburg installiert und wird von dort betrieben.

---

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Veranlassung	1
2	Unterlagen	2
3	Entwicklung des Messprogramms	3
4	Untersuchungs- und Entwicklungsschritte	4
5	Installierte Messeinrichtungen	6
5.1	Übersicht	6
5.2	Extensometer	7
5.3	Temperaturmessungen	8
5.4	Lagerkraftmessungen an allen Lagern	9
5.5	Kippspaltmessungen an den Lagern	11
5.6	Gleitspaltmessung	12
5.7	Rückverankerungssysteme	13
6	Computerprogramm	14
6.1	Allgemeines	14
6.2	Anwendermodus	14
6.3	Expertenmodus	16
7	Gesamtbewertung	18

## **Bildverzeichnis**

## **Seite**

Bild 1: Ansicht Vorlandbrücke und Strombrücke	1
Bild 2: Übersicht der Messungen	6
Bild 3: Setzungsmessungen an den Strompfeilern	7
Bild 4: Messquerschnitte für Temperaturmessungen	8
Bild 5: Anordnung der Temperaturfühler im Messquerschnitt A	8
Bild 6: Aufbau der Kalottenlager der Vorlandbrücke mit Messeinrichtung	9
Bild 7: Sensorausfälle an den Brückenlagern	10
Bild 8: Auflagerkräfte aus Wasserfüllung. Links: theoretisch, rechts Messwerte	11
Bild 9: Kippspaltnmessungen	12
Bild 10: Gleitspaltnmessung	13
Bild 11: Rückverankerungssystem an den Auflagerachsen der Vorlandbrücke	13
Bild 12: Statusanzeige nach Programmstart	15
Bild 13: Darstellung Lagerkräfte in einer Pfeilerachse	16
Bild 14: Druckmesswerte Einzellager	17
Bild 15: Darstellung der Temperaturverläufe in einem Messquerschnitt	18

## 1 Veranlassung

Die neu erbaute Kanalbrücke Magdeburg (Bauzeit 1998 bis 2003) ist eines der bedeutendsten Ingenieurbauwerke der WSV. Das Bauwerk besteht aus einer 3-feldrigen Strombrücke mit 228 m Länge und einer Mittelspannweite von 106 m. Die 16-feldrige Vorlandbrücke mit äquidistanten Stützweiten von 42,85 m hat eine Gesamtlänge von 690 m.

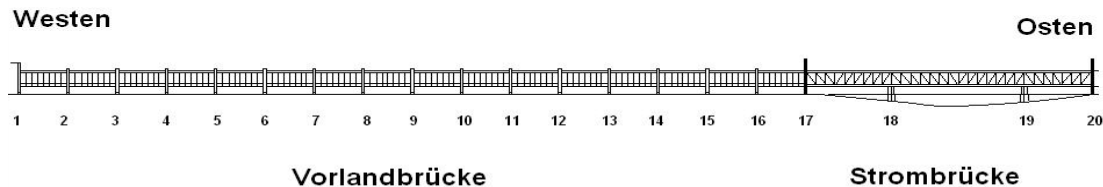


Bild 1: Ansicht Vorlandbrücke und Strombrücke

Wegen der Komplexität der Konstruktion und der technischen Randbedingungen mussten während der Planung und Ausführung innovative und noch nicht erprobte technische Lösungen entwickelt werden, die teilweise einer Zustimmung im Einzelfall bedurften. Die Vorstellung des WNA Magdeburg war daher nahe liegend, die Herstellung und den späteren Betrieb durch ein qualitätssicherndes und überwachendes Messprogramm zu begleiten.

Das Messprogramm entwickelte sich sukzessive während der Ausführungsplanung und während der Herstellung zu einem sehr umfangreichen Messprogramm. Ein Teil der Messungen waren für die Herstellung notwendig und daher zunächst nur temporär erforderlich. Weitere Überlegungen des WNA führten dann dazu, diese Messungen zu erweitern und zu einem Monitoringsystem (Dauermessung) auszubauen. In diesem Zusammenhang entstand ein Auftrag an die BAW, diese Messungen wissenschaftlich aufzubereiten und ein Monitoringsystem zur permanenten Überwachung der Brücke zu entwickeln.

## 2 Unterlagen

Neben den Bauwerksplänen und Beschreibungen standen noch folgende Unterlagen zu diesem Projekt zur Verfügung:

- [U1] Ingenieurbüro Prof. Hering: Angebot über Dehnungsmessungen an der Strombrücke Wasserstraßenkreuzes Magdeburg vom 19.05.1999.
- [U2] Prof. Dr.-Ing. K. Hering, Bundesanstalt für Wasserbau: Dehnungs- und Temperaturmessungen an der Strombrücke des Wasserstraßenkreuzes Magdeburg, 20.03.200.
- [U3] Auftragsschreiben WNA Magdeburg 4-232.2-0101/8.1.3 an BAW vom 09.11.2000.
- [U4] WSD Ost, N-232.2-III/MK B 10/4 vom 27.11.2000: Lagerkraftmessung - Kostenbetrachtung
- [U5] BAW-Auftragsbestätigung vom 18.01.2001.
- [U6] Festlegungsprotokoll des WNA Magdeburg 4-232.2-0101/8.5.6 IV vom 27.11.2002 zu einer Besprechung am 14.11.2002 im Baubüro
- [U7] MPA Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe: Prüfungsbericht Nr. 98 28 34 1035 zu Druckversuchen am Maurer-Kalottenlager V3 vom 23.11.1999.
- [U8] Univ. Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig: Gutachterliche Stellungnahme zum Trag- und Verformungsverhalten der Vorlandbrücke am Wasserstraßenkreuz in Magdeburg unter klimatischer Temperaturbeanspruchung, Dezember 1999.
- [U9] Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe: Einlagerungskonzept für die Vorlandbrücke am Wasserstraßenkreuz Magdeburg, 05.09.2001.
- [U10] Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe: Einlagerungskonzept für die Strombrücke am Wasserstraßenkreuz Magdeburg, 05.11.2001.
- [U11] Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe: Auswertung, Interpretation und Fortschreibung der Messwertaufzeichnungen und Messprogramme an den Kanalbrücken Magdeburg, Mai 2003.
- [U12] Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe: Auswertung und Interpretation der Messdaten am Wasserstraßenkreuz Magdeburg, Februar 2005.
- [U13] Univ. Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig: Gutachterliche Stellungnahme, Bewertung der Ursachen für die Funktionsstörungen an der Messeinrichtung zur Erfassung der Lagerkräfte an einem Lager der Strombrücke Magdeburg, Dezember 2006. Im Auftrag des WNA Magdeburg.
- [U14] Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe: Bauwerksmonitoring am Wasserstraßenkreuz Magdeburg, Dezember 2009.
- [U 15] Sauer, Stützel, Fluthwedel: Messung abhebender Lagerkräfte an der Kanalbrücke Magdeburg. Zeitschrift für Binnenschifffahrt, Nr. 3 – 2010.



### 3 Entwicklung des Messprogramms

Noch während der Herstellung der Brücken wurden durch den Prüfenieur Prof. Dr.-Ing. Hering Konzepte zu Bauwerksmessungen [U1] angeregt, um das komplexe Tragverhalten der Strombrücke in Längsrichtung, bestehend aus einem Vollwandträger und parallelen Fachwerkträger auch experimentell zu bestätigen. Im Rahmen einer Beratung durch die BAW wurde dieses Messkonzept um für die Interpretation notwendige Temperaturmessungen am stählernen Überbau erweitert [U2] und die Messwertaufzeichnung auch automatisiert. Entsprechend dem Auftragsschreiben des WNA Magdeburg [U3] sollte es ein gemeinsames Messprogramm von BAW und Ingenieurbüro sein.

Wenige Jahre vorher wurden beim Neubau der ebenfalls stählernen Kanalbrücke Minden während der Herstellung, d.h. ohne Wasserfüllung Abhebungen des Überbaus von den Auflagern festgestellt. Dieser zunächst nicht für möglich gehaltene Vorgang war für die BAW Anlass, diese Thematik wissenschaftlich aufzuarbeiten, siehe FuE 8088. Dabei stellte sich, neben geometrischen Imperfektionen, als wesentliche Ursache die klimatische Temperaturbeanspruchung heraus, die bei einem stählernen Trog bei Erwärmung der Oberseite zu abhebenden Lagerreaktionen führt. Als Schlussfolgerung für die Kanalbrücke Magdeburg ergab sich die Forderung nach einer gezielten kraft- und verformungsgesteuerten Einlagerung des Überbaus, insbesondere bei der Vorlandbrücke mit ihren 5 Lagern in einer Auflagerachse. Eine derartige, neuartige Einlagerungskonzeption [U8, U9, U10] ist nur mit einem gleichzeitigen Messen des Temperaturfeldes des Überbaus möglich.

Die Temperaturmessungen an der Strombrücke und der Vorlandbrücke erfüllten somit während der Herstellung der Brücken 2 Funktionen:

- Auswertung der Dehnungsmessungen an der Strombrücke durch Temperaturkompensation
- notwendige Voraussetzung für eine kraft- und verformungsgesteuerte Einlagerung der Brücke

Temperaturmessungen sind auch für eine Dauerüberwachung (Monitoring) unverzichtbar.

Bei der Strombrücke mussten auf den Strompfeilern Kalottenlager eingebaut werden, deren Konstruktion auf Grund der hohen Vertikalkräfte von 135 MN nicht durch die allgemein bauaufsichtliche Zulassung abgedeckt war. Hier musste eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erwirkt werden. In diesem Zusammenhang hat sich das WNA Magdeburg zusammen mit der WSD Ost für die Installation einer permanenten Lagerkraftmessung an allen 85 Kalottenlagern der Vorlandbrücke und allen 8 Kalottenlagern der Strombrücke entschieden und dafür auch finanzielle Ersparnisse durch frühzeitiges Erkennen von Lagerschäden und Lagerüberlastungen geltend gemacht [U4]. Des Weiteren sollte durch die Lagerkraftmessung der Erfolg der korrekten Einlagerung überprüft werden. Während für Topflager derartige Kraftmessungen bis dato schon möglich waren, waren für die hier verwendeten Kalottenlager derartige Systeme erst in der Entwicklung [U7]. In einer Besprechung im BMVBW am 29. November

2000 in Bonn wurde nach einem klaren Plädoyer des WNA und der WSD für die Dauerüberwachung die Entscheidung für die Verwirklichung dieses ungewöhnlichen und umfangreichen Monitoringsystems getroffen. Die ausführende Firma wurde daraufhin beauftragt, entsprechende Lager mit Sensoren zur Vertikalkraftmessung und Kippspaltmessung einzubauen und die anfallenden, automatisiert erfassten Messdaten auf einem zentralen Rechner im Widerlager Ost zusammenzuführen und abzuspeichern.

Bei einer Besprechung am 14.11.2002 im Baubüro der Kanalbrücke [U6] wurde festgestellt, dass weder das WNA, noch das WSA Magdeburg als späterer Betreiber der Brücke in der Lage sind, die Messwerte wissenschaftlich auszuwerten und Grenzwerte als Alarmwerte vorzugeben. Diese Aufgabe wurde an die BAW übertragen und war damit Auslöser für das hier behandelte FuE-Vorhaben, das durch eine Beauftragung des Ingenieurbüros Mangerig und Zapfe, München bearbeitet wurde [U11], da entsprechende Personalkapazitäten sowie Programmierkenntnisse in der BAW nicht vorhanden waren.

Während der Bearbeitung gab es regelmäßige Besprechungen in Magdeburg unter Beteiligung von Vertretern des WNA und WSA Magdeburg sowie der WSD Ost (20.03.2003, 29.01.2004, 18.05. 2004, 28.04.2005, 17.05.2006, 29.06.2007 und 06.11.2008). Dabei wurde der jeweilige Bearbeitungsstand erläutert, das weitere Vorgehen besprochen und Anregungen der späteren Nutzer (WSA Magdeburg, WSD Ost) aufgegriffen. Auch die Grenzen der Auswertung und der Überwachung wurden aufgezeigt, die vor allem vom Ausfall von Drucksensoren bei der Lagerkraftmessung herrühren [U13]. Bei diesen Besprechungen wurde seitens der Zentralen Brückenprüfung angeregt, die Messungen um Gleitspaltmessungen an den Brückenlagern und Kraftmessungen an den Lagerrückverankerungen zu ergänzen. Durch die kontinuierliche Gleitspaltmessung kann die Brückenprüfung nach DIN 1076 erheblich erleichtert werden und durch das Beobachten der Rückverankerungen ist jederzeit die Zulässigkeit einer Trogentleerung ohne Gefahr eines Lagerabhebens feststellbar. und Die notwendige Messtechnik wurde nachgerüstet und in das Monitoringsystem integriert.

#### **4 Untersuchungs- und Entwicklungsschritte**

Die sehr aufwändigen Untersuchungen und Entwicklungen bis hin zu einem anwendungsreifen Monitoringsystem wurden durch das Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe, München durchgeführt. Prof. Mangerig ist ausgewiesener Experte für die Simulation von klimatischen Temperaturbeanspruchungen von Bauwerken. Durch das FuE- Vorhaben 80 88 wurden durch Messungen und rechnerische Simulationen an den Kanalbrücken Minden und Leine durch Prof. Mangerig im Auftrag der BAW erstmals Temperaturfelder zur Bemessung von Kanalbrücken entwickelt. Weiterhin lagen bei dem Ingenieurbüro Erfahrungen bei der kraft – und verformungsgesteuerten Einlagerung von Kanalbrücken vor (Kanalbrücken Leine, MLK und Schwarzach, MDK). Diese Erfahrungen wurden auch bei der Kanalbrücke Magdeburg mit eingebracht.

Die Untersuchungen und Entwicklungen gliedern sich im Wesentlichen in 2 Phasen [U11]:

1. Auswertung und Interpretation der Messdaten während der Bauausführung, Probefüllung und im ersten Betriebsjahr.

- Auswertung und Analyse der Messwertaufzeichnungen.
- Beurteilung der Qualität der Messdaten und die Zuverlässigkeit der Sensorik.
- Realitätsnahe Simulation des Trag- und Verformungsverhaltens durch räumliche FE-Berechnungen, Korrelation zu den Messungen.
- Feststellung der Eignung des vorhandenen Messsystems für eine dauerhafte Bauwerksüberwachung.

Dieser Teil ist ausführlich in [U12] dokumentiert.

2. Weiterentwicklung des Messprogramms zu einem Monitoringsystem:

- Detektion und Kompensation des Ausfalls von Messfühlern
- Erstellen von Berechnungsalgorithmen
- Festlegung von Aschranken und Schwellenwerten
- Entwicklung einer graphischen Oberfläche mit Positionierung sämtlicher Messorte und graphischer Darstellung der Messgrößen in verschiedenen Ebenen
- Test der Software und Implementierung beim Betreiber (WSA Magdeburg)

Dieser Teil ist ausführlich in [U14] dokumentiert.

Inzwischen ist das Monitoringsystem betriebsbereit beim WSA Magdeburg installiert und wird vom Amt bedient.

Die Auswertung der Dehnungsmessungen durch das Ingenieurbüro Prof. Hering, Braunschweig gemäß [U2] wurde durch das WNA Magdeburg direkt und unabhängig von dieser Entwicklungsaufgabe beauftragt. Es war angedacht, während der Probefüllung im Oktober 2002 und der anschließenden Entleerung die Stahldehnungen im Haupttragwerk unter Lastbeanspruchungen zu messen. Die ursprünglich vom Ingenieurbüro vorgesehene händische Messung der Dehnungsaufnehmer wurde auf Betreiben und mit Unterstützung der BAW (die Vielstellenmessanlage UPM 100 der BAW wurde zur Verfügung gestellt) automatisiert.

Ergebnisse und Auswertungen sind hier nicht bekannt.



## 5.2 Extensometer

Zur Beobachtung des Setzungsverhaltens während der Bauphase und im Betriebszustand wurde von der BAW Ilmenau ein Messprogramm mit Extensometern an den 4 Strompfeilern installiert.

Anhand der Messdaten konnten Setzungsberechnungen durchgeführt werden, die mittels geodätischer Vermessung bestätigt werden konnten. Die Messdaten der Einrichtungen zur Setzungsüberwachung stehen seit dem 04.07.2003 auf dem Zentralrechner zur Verfügung.

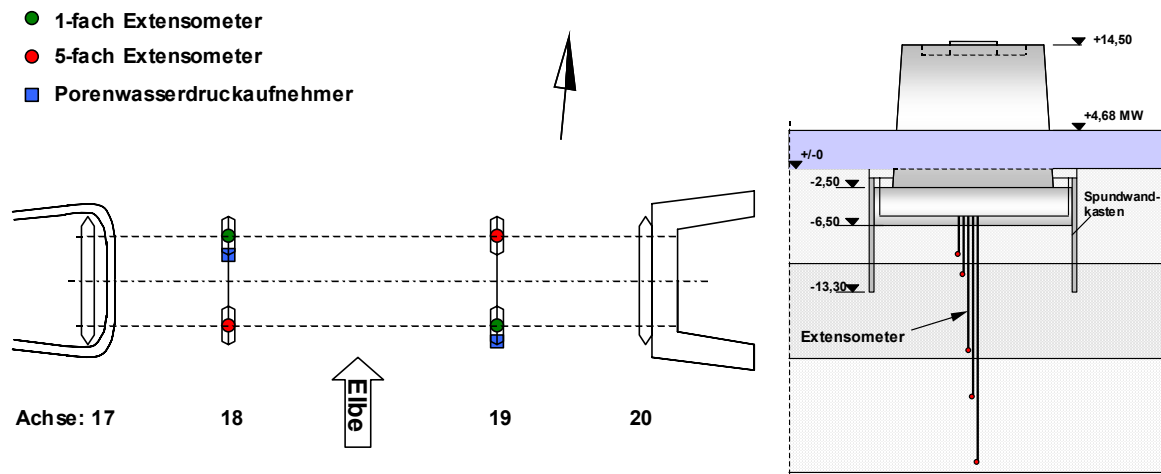


Bild 3 Setzungsmessungen an den Strompfeilern

Anhand der Messdaten konnten Setzungsberechnungen durchgeführt werden, die mittels geodätischer Vermessung bestätigt werden konnten. Die Messdaten der Einrichtungen zur Setzungsüberwachung stehen seit dem 04.07.2003 auf dem Zentralrechner zur Verfügung.

Im Jahr 2008, insbesondere im Zeitraum um die Trogentleerung waren umfängliche Signalstörungen vorhanden. Die Porenwasserdruckmessungen im Pfeiler 19 (Süd) deuten darauf hin, dass ein Signalfehler am Sensor PWD 3 vorliegt. Am Pfeiler 19 (Nord) werden nach einer Störung an den Messaufnehmern keine Daten mehr aufgezeichnet.

### 5.3 Temperaturmessungen

Temperaturmessungen sind selbstverständlicher Bestandteil eines Bauwerksmonitorings. Sie wurden seitens der BAW frühzeitig eingebracht, siehe Abschnitt 3, zunächst als notwendige Maßnahme zur Auswertung der Dehnungsmessungen an der Strombrücke und zur zielgerichteten Einlagerung. Die Installation der Pt-100-Fühler erfolgte durch das Referat Z2 der BAW.

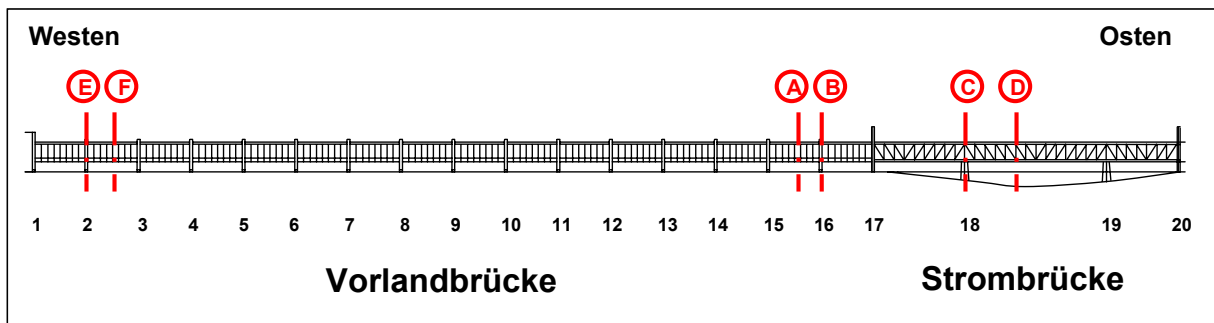


Bild 4: Messquerschnitte für Temperaturmessungen

Die Messquerschnitte A und B sowie C und D sind so konzipiert, dass für Vorland- und Strombrücke das instationäre Temperaturfeld der gesamten Brücke unter Berücksichtigung der Querrahmen sowie Luft- und Wassertemperatur komplett erfasst werden können. Die Querschnitte E und F sind redundant zu A und B während der Einlagerung und sind nicht mehr an das Monitoringsystem angeschlossen.

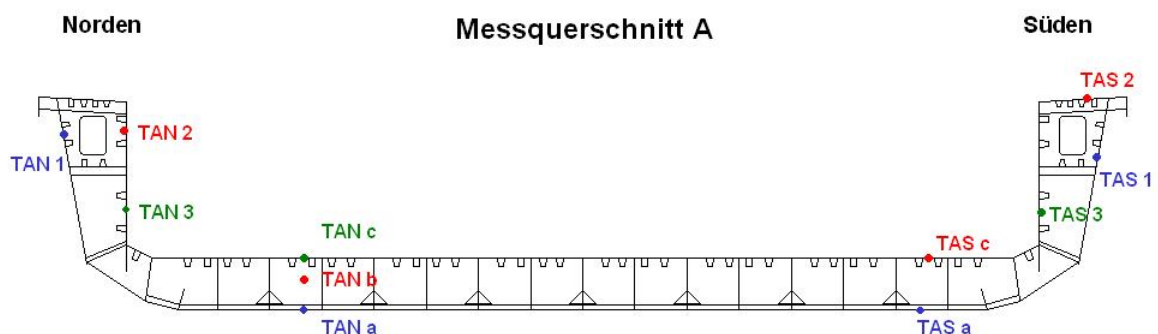
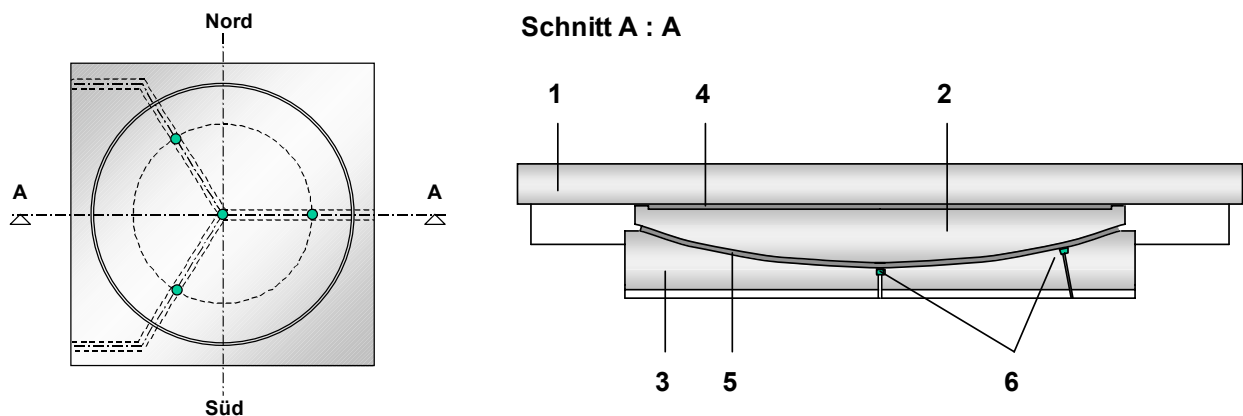


Bild 5: Anordnung der Temperaturfühler im Messquerschnitt A

Die Temperaturmesseinrichtung funktioniert bisher zuverlässig und ohne Störungen.

## 5.4 Lagerkraftmessungen an allen Lagern

Ein wesentliches Element in der Konzeption des Gesamtmessprogramms liegt in der permanenten Aufzeichnung und Überwachung der Lagerkräfte. Aufbauend auf einer patentierten technischen Lösung der Firma Maurer, München sind die Lager mit Drucksensoren bestückt, die eine Erfassung der Druckverteilung in der gekrümmten Gleitfläche der Kalotte an 4 Messpunkten bei den kleinen Lagern und bei 10 Messstellen an den großen Lagern auf den Strompfeilern gestatten, vgl. [U7].



1 = Lageroberteil mit ebener Gleitplatte, 2 = Kalotte, 3 = Lagerunterteil,  
4,5 = PTFE-Platten, 6 = Drucksensoren

Bild 6: Aufbau der Kalottenlager der Vorlandbrücke mit Messeinrichtung

Zusätzlich ist in Abweichung von konventionellen Kalottenlagern unter der PTFE-Platte (5) eine extra gekammerte, ungefettete 6 mm dicke Silikonkautschukfolie angeordnet. An dessen Unterseite wird mittels Miniatur-Drucksensoren (6) die örtliche Lagerpressung ermittelt, indem die lokale Pressung in der Silikonfolie auf die Membran der Drucksensoren übertragen wird.

Im Rahmen von Laboruntersuchungen durch die Universität Karlsruhe [U7] wurden mehrere Be- und Entlastungsversuche durchgeführt, in denen das Versuchslager jeweils zentrisch mittels einer 15000 kN Prüfmaschine belastet wurden. Hierbei wurde die Korrelation zwischen der aufgetragenen Last und den gemessenen Sensordrücken beobachtet. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Einzelwerte der gemessenen Sensordrücke maximal um 5 % von der mittleren PTFE-Pressung abweichen. Dem geprüften Messverfahren wurde eine gute Eignung zur Messung von Lagerkräften bescheinigt.

Leider ist die Zuverlässigkeit der Lagerkraftmessungen unzureichend. Es gab nach kurzer Zeit Sensorausfälle, die sukzessive zunahmen und deren Ursache nicht eindeutig geklärt ist. Auch der Austausch eines Lagers der Strombrücke am westlichen Trennpfeiler im Jahr 2006 [U13] konnte nicht zu einer eindeutigen Klärung beitragen. Bei der Strombrücke sind die Sensoren der 4 Lager auf den Strompfeilern komplett ausgefallen, an den Endauflagern der

Strombrücke sind nur stark eingeschränkte Aussagen zur gemessenen Lagerkraft möglich. Bei den 85 Lagern der Vorlandbrücke liefern nur 3 Lager keine ausreichenden Messsignale. Bei den übrigen 82 Lagern ist die Zuverlässigkeit der Messungen zum Teil eingeschränkt, da die Einzelwerte der 4 Sensoren stark vom Mittelwert abweichen oder einzelne Sensoren innerhalb eines Lagers ausgefallen sind.

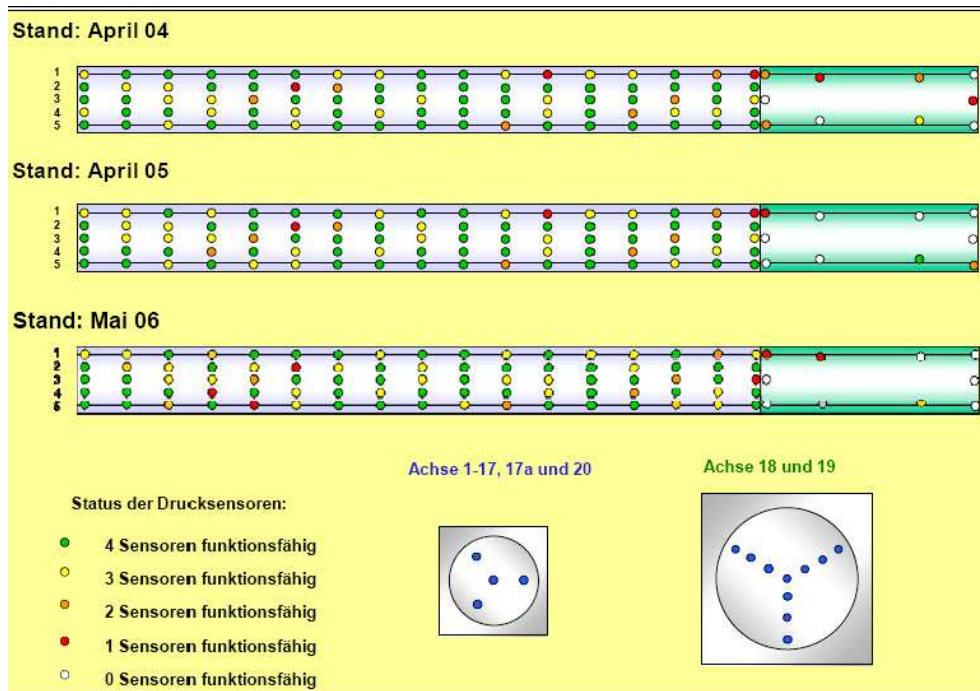


Bild 7: Sensorausfälle an den Brückenlagern

Die Messtechnik zur Lagerkraftmessung bei Kalottenlagern erweist sich leider als noch nicht ausgereift, so dass hinsichtlich des Monitoringsystems Einschränkungen hinzunehmen sind.

Da die gemessenen Lagerkräfte, was sowohl die Einzelwerte als auch den Mittelwert angeht, recht stark streuen, wurde eine Kalibrierung durch das probeweise (Jahr 2002) und planmäßiges (Jahr 2008) Füllen und Leeren des Troges vorgenommen. Dadurch kann der gemessene Anteil aus der dominierenden Wasserlast ermittelt werden. Dieser Anteil ist unabhängig von Imperfektionen oder Kräfteumlagerungen:



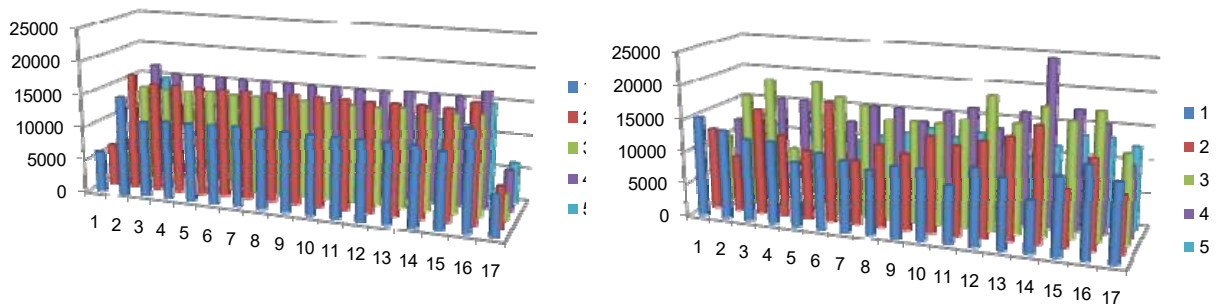


Bild 8: Auflagerkräfte aus Wasserfüllung. Links: theoretisch, rechts Messwerte

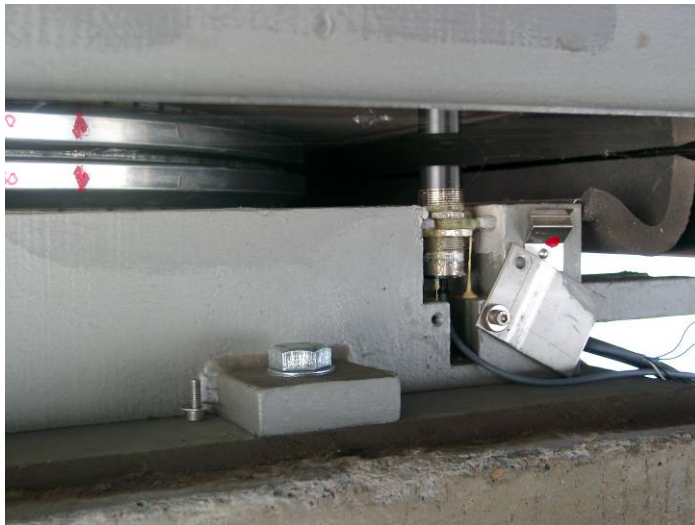
Aus Bild 8 ergibt sich anschaulich die Notwendigkeit von Fehlerkorrekturen. Aus den Abweichungen bei der Wasserlast werden Korrekturfaktoren  $C_i$  individuell für jedes Lager ermittelt. Hinzu kommt noch ein Statusfaktor  $k$ , der entweder den Wert 1 (Messwerte sind verwendbar) oder 0 (Messwerte sind nicht verwendbar) annehmen kann.

Die nachträgliche Umrechnung der verwertbaren Druckmessdaten ermöglichen keine Feststellung von Kräfteumlagerungen, die in der Vergangenheit infolge von Schäden und Mängel aufgetreten sein könnten. Durch den gewählten Korrekturansatz wird unterstellt, dass das Bauwerk bei der letzten Lagerkraftkalibrierung im 1. Halbjahr 2008 im Hinblick auf die Auflagerkraftverteilung fehlerfrei war.

## 5. 5 Kippspaltnmessungen an den Lagern

Zur messtechnischen Erfassung von Veränderungen der Gleitspalte, bestehend aus dem Gleitflächenspalt und dem Kalottengleitpalt, sind sämtliche Lager an der Strom- und der Vorlandbrücke mit je 4 Wegsensoren bestückt.

Die Messsignale liefern die Abstände der Lagerplatten zueinander in einem Zeitabstand von 30 Minuten. Aus den Daten der Messaufzeichnungen kann eine Änderung der aufsummierten Spaltmaßes zwischen dem Messgeber und der oberen Lagerplatte abgeleitet werden. Ursprünglich sollte damit auch der Gleitpalt erfasst werden. Da aber keine Nullmessung des Gleitpalt z.B. mit der Fühlerlehre stattgefunden hat, ist dies nicht möglich.



### Vorlandbrücke

induktiver Analogwertgeber  
ANT 5-15  
Messbereich 5-15 mm

### Strombrücke

Kompaktwegsystem  
DT 110-T-U40-A-26  
Messbereich bis 40 mm

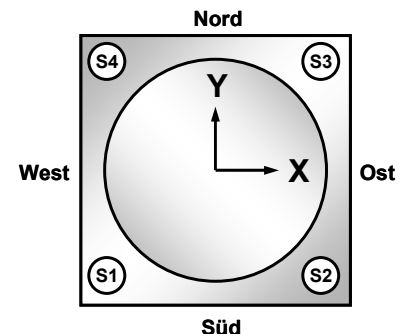


Bild 9: Kippspaltmessungen

Aus den Messwertaufzeichnungen können die Lagerverdrehungen  $\varphi_x$  (Verdrehung des Lagers um die Längsträgerachse) und  $\varphi_y$  (Verdrehung um Brücken querachse abgeleitet werden:

$$\varphi_x = \frac{1}{2 \cdot d_y} \cdot [(s_4 - s_1) + (s_3 - s_2)]$$

$$\varphi_y = \frac{1}{2 \cdot d_x} \cdot [(s_1 - s_2) + (s_4 - s_3)]$$

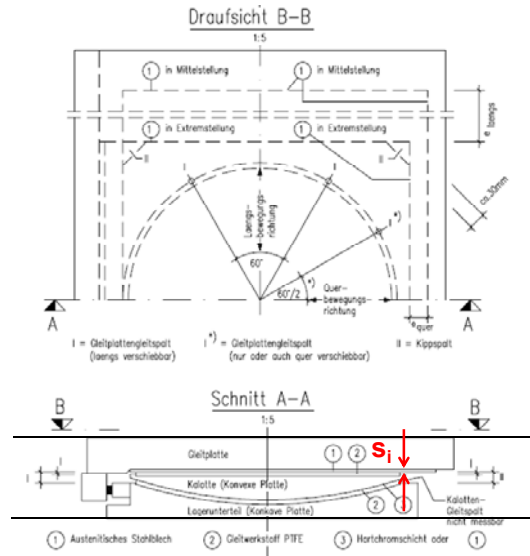
Im Lauf der Zeit sind einige Sensoren ausgefallen bzw. weisen Störungen auf. Allerdings ist bei Ausfall auch nur eines Sensors die Ermittlung der verdrehung nicht mehr möglich. Es wird empfohlen, die Funktionsfähigkeit wieder herzustellen.

## 5.6 Gleitspaltmessung

Nach ersten Erfahrungen mit der Verwendbarkeit der Kippspaltmesswerte für die Beurteilung des Gleitspalts wurden ergänzende Messvorrichtungen installiert, die über 4 Sensoren je Lager die Abstände zwischen den Kalottenrändern und der oberen Gleitebene aufzeichnen.

Die Messwerte der Gleitspaltsensoren wurden auf Vergleichswerte aus einer Fühllehrenmessung kalibriert und in der Erprobungsphase mehrfach überprüft. Hierbei wurde festgestellt, dass annähernd die tatsächlich am Bauwerk auftretenden Werte aufgezeichnet werden. Hieraus können im Rahmen des Bauwerksmonitorings Rückschlüsse auf den Lagerverschleiß gezogen werden.

Bild 10: Gleitspaltmessung



## 5.7 Rückverankerungssysteme

Um im Zustand „leerer Trog“ ein Abheben der Lager unter klimatischer Temperaturbeanspruchung zu vermeiden, wurden an jeder Lagerachse der Vorlandbrücke 4 Rückverankerungssysteme mit einer planmäßigen Vorspannung am Spannglied von 689 kN eingebaut.

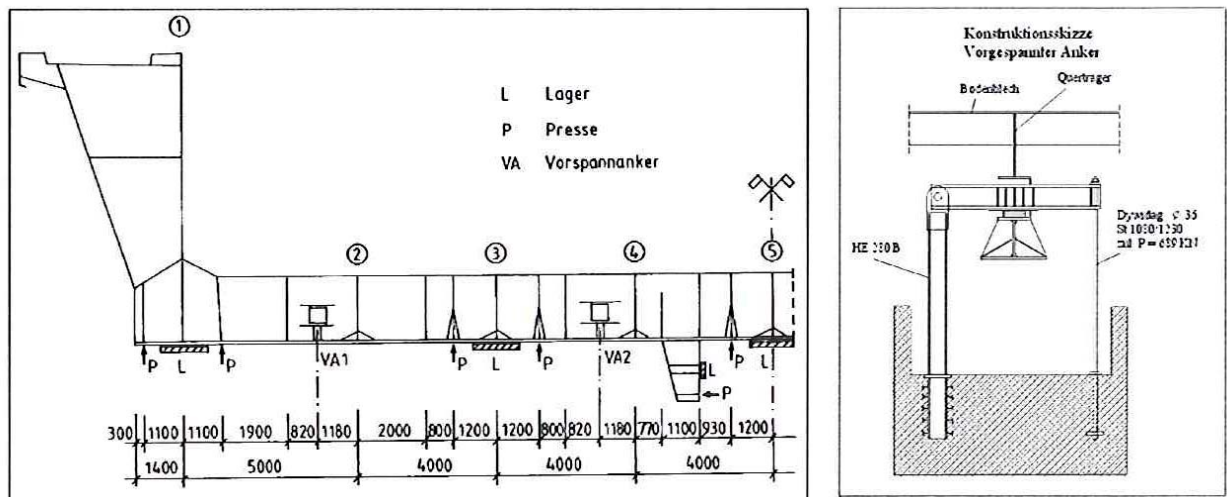


Bild 11: Rückverankerungssystem an den Auflagerachsen der Vorlandbrücke

Nachdem bei der Trockenlegung 2008 zur Durchführung der 1. Brückenhauptprüfung vor Ablauf der Gewährleistungspflicht Zweifel an der Dauerhaftigkeit der Vorspannkraft aufkamen und auch nachzuspannen war, entschloss man sich, die Rückverankerung mit Kraftmessdosen auszustatten und in das Monitoringsystem zu integrieren.

Die Kraftmesseinrichtungen an den jeweils 4 Rückverankerungen pro Auflagerrahmen der Vorlandbrücke wurden erst im Spätsommer 2008 bei befülltem Trog installiert. Erfahrungen mit den Langzeiteigenschaften liegen folglich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vor. Die Kurven der Ankerkräfte weisen deutlich ausgeprägte tageszeitliche Schwankungen auf, während jahreszeitliche Schwankungen bei der Mehrzahl der Pfeilerachsen nur wenig ausgebildet sind.

Bei einer Trogleerung ist durch das elastische Rückfedern der Lager tendenziell eine Erhöhung der Rückverankerungskraft zu erwarten, wobei die zulässigen Kräfte nicht überschritten werden dürfen.

## **6 Computerprogramm**

### **6.1 Allgemeines**

Um das Monitoringsystem können, ist eine Software in der Microsoft Windows Umgebung entwickelt worden. Das Monitoringsystem wurde auf HTML-Basis mit PHP-Erweiterung angelegt und ist mit handelsüblicher Browser-Software nutzbar.

Die Benutzeroberfläche des Bauwerksmonitoringsystems ist in zwei verschiedene Betriebsbereiche, den Anwender- und den Expertenmodus unterteilt. Im Anwendermodus werden solche Daten verarbeitet, die eine unmittelbare Aussage über die Betriebssicherheit des Bauwerks gestatten und die Soll- bzw. oberen und unteren Schranken gegenübergestellt werden können. Im Expertenmodus können die eigentlichen Messgrößen eingesehen werden. Diese Daten werden zwar im Rahmen der Konsolidierung im Hinblick auf Ausreißer und Aussetzer ebenfalls konsolidiert, funktionslose oder gestörte Einzelsensoren sind jedoch erkennbar.

### **6.2 Anwendermodus**

Das System startet im Anwendermodus und zeigt zunächst eine Statusübersicht zum aktuellen Zustand bezüglich Lagerkraft, Lagerverdrehung und Pegelstand. Eine grüne Ampelanzeige zeigt, dass keine Auffälligkeiten vorliegen.

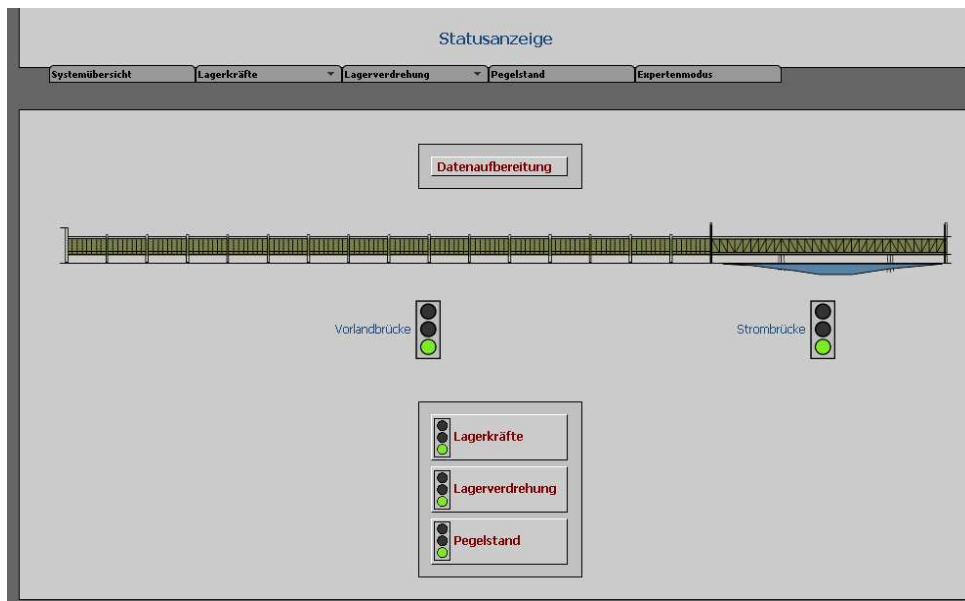


Bild 12: Statusanzeige nach Programmstart

Danach kann ein Datenabruf vom Datenserver an der Brücke gestartet werden. Das Programm überträgt alle noch nicht vorhandenen Daten bis zum aktuellen Datum auf den Rechner des Anwenders.

Der Anwendermodus umfasst die wichtigsten Funktionen und ist auf komfortable Bedienung ausgelegt. Es stehen diverse Übersichten zur Verfügung. Die Diagrammerstellung beschränkt sich zur Vereinfachung auf die vier vordefinierten Zeiträume Woche, Monat, Quartal und Halbjahr. Im Anwendermodus stehen folgende Kategorien der Messwertüberwachung und -darstellung zur Verfügung:

- Lagerkräfte
  - o Einzellager
  - o Pfeilerachse
  - o Ankerkräfte
  - o Drucksensorenstatus
  - o Lagerschema
- Lagerverdrehung
  - o Einzellager längs
  - o Pfeilerachse längs
  - o Einzellager quer
  - o Pfeilerachse quer
- Pegelstand
- Wechsel zum Expertenmodus

Beispielhaft wird im nächsten Bild die Bildschirmdarstellung der Lagerkräfte einer ausgewählten Pfeilerachse gezeigt

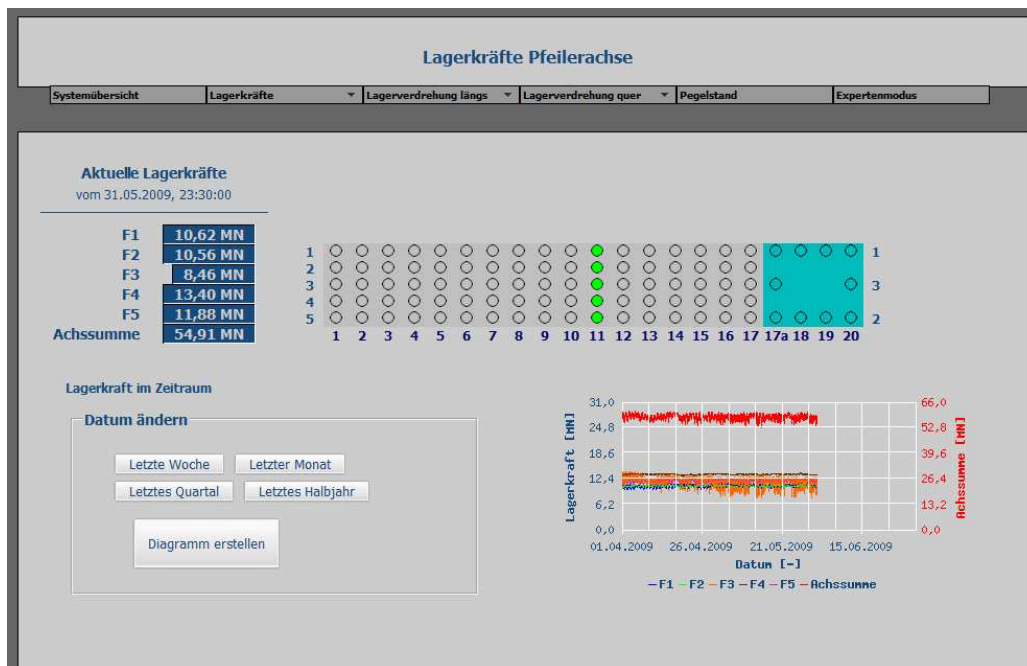


Bild 13: Darstellung Lagerkräfte in einer Pfeilerachse

Der Anwendungsbereich der Anzeige für die Pfeilerachsen besteht hauptsächlich in der Überprüfung im Fall von ungewöhnlichen Veränderungen an Einzellagern. So könnte eine Grenzwertverletzung eines Einzellagers bei unveränderter Achssumme ein Indiz für einen Bauwerksschaden in Verbindung mit entsprechenden Kräfteumlagerungen sein. Grenzwertverletzungen mit gleichzeitigen Veränderungen an den Achssummen könnten dagegen auf Störungen an Einzelsensoren oder auf das Versagen von Rückverankerungen hindeuten.

### 6.3 Expertenmodus

Der Expertenmodus erweitert den Anwendermodus um Funktionen und Bedienelemente. So ist es hier möglich, Zeiträume selbst frei zu definieren. Im Expertenmodus stehen folgende Kategorien zur Verfügung:

- Lagerkräfte
  - o Lagerdruckmesswerte
  - o Drucksensorenstatus
- Lagerverformung
  - o Gleitspaltmessung
  - o Spaltsensorenstatus
  - o Kippspaltmessung (Abstand Lagerplatten)
  - o Spaltsensorenstatus
- Setzungen
  - o Pfeiler 18 Nord
  - o Pfeiler 18 Süd
  - o Pfeiler 19 Nord
  - o Pfeiler 19 Süd

- Temperatur
  - Messquerschnitt A (Vorlandbrücke Trog)
  - Messquerschnitt B (Vorlandbrücke Pfeiler)
  - Messquerschnitt C (Strombrücke Pfeiler)
  - Messquerschnitt D (Strombrücke Trog)
- Wechsel zum Anwendermodus

Beispielhaft werden die Druckmesswerte für Einzellager in Bild 14 dargestellt. Es können die aktuellen Messgrößen der einzelnen Drucksensoren eines Einzellagers sowie Veränderungen über auswählbare Zeiträume eingesehen werden. Der grüne Kreis zeigt das aktuell ausgewählte Lager an. Der Zeitraum kann über die Dialog- und Auswahlfelder beliebig gewählt werden. Darüber hinaus kann zwischen der Verwendung von rohen und aufbereiteten Daten gewählt werden.

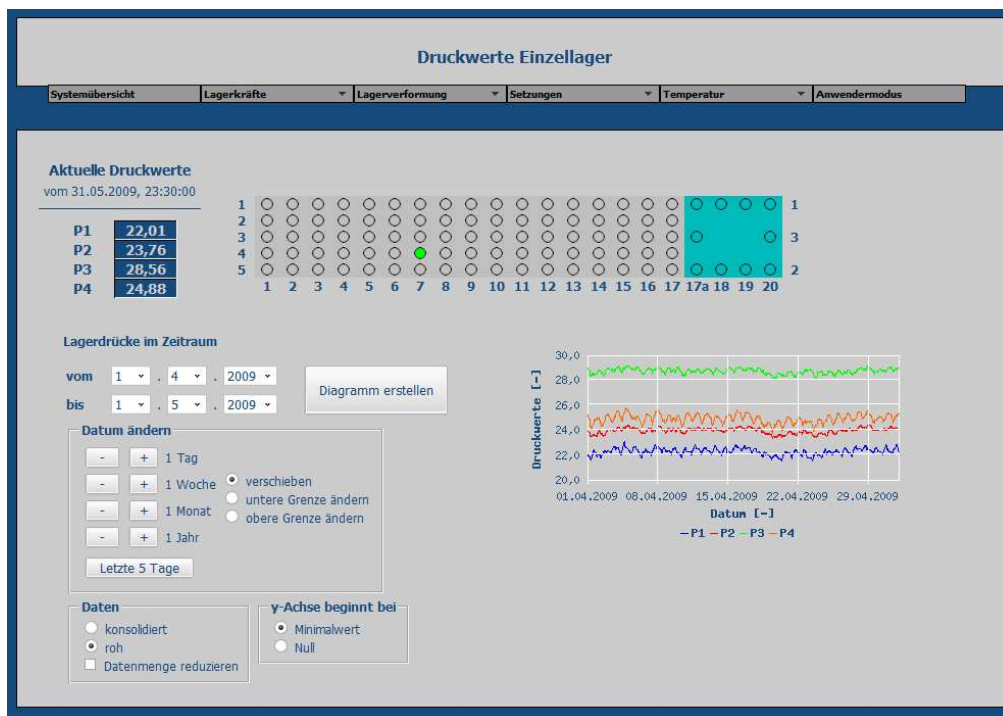


Bild 14: Druckmesswerte Einzellager

Ein weiteres Beispiel für die Auswahlmöglichkeit zeigt Bild 15 mit der Darstellung von Temperaturverläufen



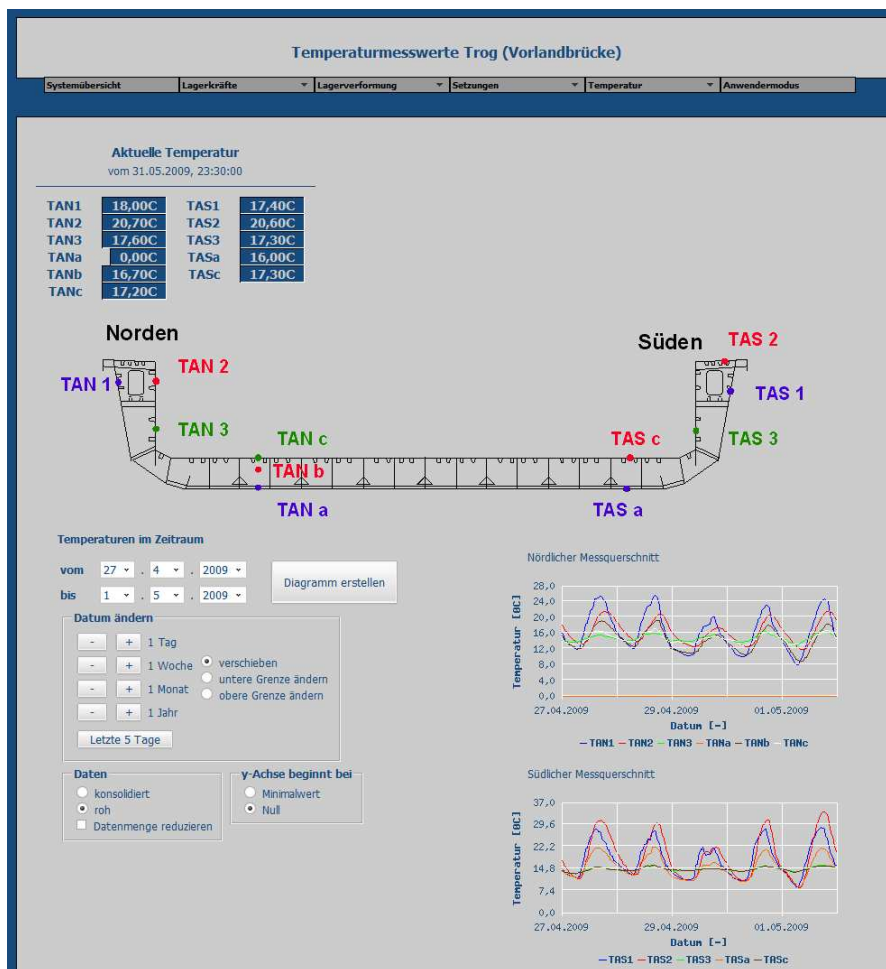


Bild 15: Darstellung der Temperaturverläufe in einem Messquerschnitt

## 7 Gesamtbewertung

An der Kanalbrücke Magdeburg wurde auf Veranlassung und im Auftrag des WNA Magdeburg, unterstützt durch die WSD Ost, ein aufwändiges Messsystem zur permanenten Überwachung der Brücke installiert. Damit sollen rechtzeitig Unregelmäßigkeiten erkannt und Schäden vermieden werden. Des Weiteren dient es zur effizienten Unterstützung bei der Bauwerksinspektion (Brückenprüfung). Vergleichbare Messeinrichtungen an anderen Brücken sind nicht bekannt.

Aufgabe der BAW war es, die sehr umfangreichen Messdaten auszuwerten, für ein Überwachungssystem aufzubereiten und ein Monitoringsystem zu entwickeln und dem Unterhaltungsamt, dem WSA Magdeburg, zur Verfügung zu stellen. Vereinbarungsgemäß wurde diese Aufgabe im Rahmen eines BAW-Forschungsvorhabens an das Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe vergeben.



Neben Setzungsmessungen an den Strompfeilern, Temperaturmessungen am stählernen Überbau und Wasserstandsmessungen umfasst das Messprogramm vor allem die permanente Überwachung der Lager von Vorland- und Strombrücke hinsichtlich Auflast, Verformungen und Vorspannung der Rückhängesysteme der Vorlandbrücke.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden zunächst die Messdaten gesichtet und ausgewertet und auf ihre Tauglichkeit für ein Monitoringsystem geprüft. Dabei war die Zielsetzung, ein zwar umfassendes aber gleichzeitig einfaches System zur Darstellung des Bauwerkszustandes zu entwickeln, z.B. in Form einer Ampeldarstellung, wobei die grüne Farbe den ordnungsgemäßen Zustand signalisiert.

Die Entwicklungsleistung bestand in der ersten Phase vor allem darin, die riesigen Mengen an Rohdaten zu plausibilisieren und zu konsolidieren, um sie dann einer Auswertung zugänglich zu machen. Im Rahmen der Datenanalysen wurden die Messreihen sämtlicher Messeinrichtungen graphisch dokumentiert, analysiert und hinsichtlich Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bewertet. In diesem Kontext wurden Gründe für Messfehler identifiziert und Routinen entwickelt, mit deren Hilfe kurzzeitige Störungen und Messfehler kompensiert werden können. Eine parallel zu den Messungen verlaufende Datenkonsolidierung ist erforderlich, damit nicht bei untergeordneten Messstörungen sofort ein Warnstatus angezeigt wird. Das bedeutet, dass das Überwachungskonzept nicht über eine zu hohe Empfindlichkeit verfügen darf, ohne auf der anderen Seite Einbußen bei der Zuverlässigkeit hinzunehmen.

Für ein Überwachungssystem war die ständige Veränderlichkeit der Messwerte in einen Zusammenhang zu den Ursachen zu stellen. Hierzu war ein wirklichkeitsnahes Strukturmodell als räumliches FE-Modell zu erstellen. Maßgebliche planmäßige Einwirkungen sind die Wasserfüllung und die klimatische Temperaturbeanspruchung, deren Auswirkungen in Form von Bauwerksreaktionen messtechnisch erfasst werden. Dadurch konnten dynamische Schranken für das Monitoringsystem entwickelt werden. Die Schwierigkeiten bestanden vor allem auch darin, aus den gemessenen instationären Temperaturfeldern die Bauwerksreaktionen in ausreichender Genauigkeit abzuleiten, was auch gelungen ist.

Problematisch an den ganzen Messungen ist die unzureichende Zuverlässigkeit der Lagerdruckmessungen. Dies bezieht sich sowohl auf den Ausfall von Drucksensoren als auch auf noch funktionstüchtige Sensoren, da die Streuung der Messwerte sehr groß ist, so dass eine Kalibrierung der Messwerte eines jeden Lagers beim Füllen und Leeren des Troges mit Wasser erfolgen muss. Aber auch dann ist die dauerhafte Zuverlässigkeit nur eingeschränkt gegeben. Aufgrund der Störanfälligkeit der Drucksensoren ist eine solche Kalibrierung in gewissen Zeitabständen im Rahmen von Wartungsleistungen zu wiederholen. Voraussetzung für diese Kalibrierung ist, dass eine Zeitsequenz ausgewertet werden kann, in der Daten des vollen Troges und des leeren Troges zu Verfügung stehen. Aus diesem Grund ist eine automatische Anpassung des Berechnungsalgorithmus bei auftretenden signifikanten Veränderungen an den Messsignalen von Einzelsensoren problematisch.

Mit dieser Störanfälligkeit der Drucksensoren in den Kalottenlagern, die nachträglich nur mit sehr großem Aufwand – wenn überhaupt – zu beheben wäre, muss eine wichtige Messgröße des gesamten Monitoringsystem leider als nicht dauerhaft zuverlässig eingestuft werden. Obwohl diese Eigenschaft außerhalb des FuE-Vorhabens angesiedelt ist und auch nicht beeinflusst werden kann, schmälert diese messtechnische Störung den Erfolg dieses FuE-Projektes.

Trotzdem kann abschließend festgestellt werden, dass mit diesem FuE-Vorhaben ein System entwickelt wurde, das bei einer gut funktionierenden Messtechnik eine einfache und schnelle Bauwerksdauerüberwachung zulässt und zuverlässig dokumentiert.

Die Anwendung von Monitoringsystemen an Bauwerken muss allerdings auf Sonderfälle beschränkt bleiben und muss dann bezüglich des Umfanges genau abgewogen werden und sollte hinsichtlich der Messgrößen auf ein relevantes Minimum beschränkt werden.

Die anwendungsreife Entwicklung des Monitoringsystems ist ausführlich in den Unterlagen [U12] und [U14] dokumentiert.

**Bundesanstalt für Wasserbau**

Karlsruhe, den 18. März 2010

Im Auftrag

Rainer Ehmann  
(Dipl.-Ing.)